

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ ИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ

Аннотация

Исследованы закономерности формирования гранулометрического состава продуктов разрушения железорудного агломерата при испытании по ISO 13930. Установлено, что рост барабанной пробы +5 мм сопровождается повышением крупности продуктов разрушения спека при восстановлении; при повышении основности агломерата растет как «холодная», так и «горячая» прочность; выход класса –0,5 мм при восстановлении ($LTD_{-0,5}$) снижается по мере роста истираемости агломерата. Определено, что формирование пыли класса –0,5 мм из агломерата обусловлено только механическим истиранием при его транспортировке и прохождении через шахту доменной печи, при незначительном влиянии внутренних напряжений.

Ключевые слова: железорудный агломерат, прочность, основность, доменная печь.

Abstract

The regularities of formation of the granulometric composition of decay products of iron ore sinter in test ISO 13930. It is found that the growth of the tumble index + 5mm is accompanied by an increase in the size of the sinter fracture products during recovery; with an increase in the basicity of the agglomerate, both "cold" and "hot" strength increases; the yield of the class –0,5 mm during recovery ($LTD_{-0,5}$) decreases as the abrasion of the agglomerate increases. It is determined that the formation of dust of class –0,5 mm from the sinter is caused only by mechanical abrasion during its transportation and passage through the shaft of the blast furnace, with little impact of internal stresses.

Key words: iron ore sinter, strength, basicity, blast furnace.

В условиях восстановительно-тепловой обработки железорудных агломератов в доменной печи в структуре спеков формируются внутренние напряжения, релаксация которых приводит к образованию трещин и разрушению кусков [1]. С точки зрения технологии доменной плавки, эти явления оказывают негативное влияние на ход технологического процесса вследствие снижения порозности и газопроницаемости столба шихты, а также увеличения выноса пыли из рабочего пространства печи [2]. В связи с этим разработка технических решений, снижающих разрушаемость агломератов в условиях доменной печи, является актуальной задачей, попытка приблизиться к ее решению предпринята авторами данной работы. Ее цель состоит в выявлении количественной связи между показателями прочности агломерата в «холодном состоянии» и гранулометрическим составом после восстановительно-тепловой обработки, и разработка на этой основе рекомендаций по повышению качества агломерата из окисленных и неокисленных железистых кварцитов КМА.

Гранулометрический состав доменного агломерата наиболее часто оценивают по содержанию класса -5 мм, а его прочность (в соответствии с ГОСТ 13157–77) по выходу классов $+5$ мм и $-0,5$ мм после испытания в барабане [3]. Эти данные достаточно информативны при оценке устойчивости спеков при транспортировке, однако их недостаточно для прогнозирования изменения свойств железорудного сырья в доменной печи. Поэтому дополнительно используются показатели «прочности при восстановлении», определяемой, например, в соответствии со стандартами ISO 13930 и ISO 4696. Показателями качества в испытаниях служат изменения гранулометрического состава агломерата (выход классов $+6,3$ мм; $+3,15$ мм; $-0,5$ мм) при нагреве его в восстановительной атмосфере. В качестве метода исследования в работе было использовано физическое моделирование процесса агломерации с последующим определением качества спека по ГОСТ 13157–77 и ISO 13930.

Сущность методики ISO 13930 заключается в восстановлении пробы газообразным восстановителем во вращающемся барабане (диаметром 150 мм, длиной 540 мм и толщиной стенок 5–7 мм с двумя диаметрально расположенными на внутренней поверхности полками шириной 20 мм и толщиной 4 мм) при заданном температурном режиме и последующей классификации испытуемого материала на классы крупности $+6,3$; $-3,15$ и $-0,5$ мм. Условия проведения испытания следующие: скорость вращения барабана – 10 мин $-1 \pm 0,2$ мин⁻¹; объемная скорость подачи восстановительного газа – 20 дм³/мин; состав восстановительного газа – $(20 \pm 0,5)$ % CO, $(58 \pm 1,0)$ % N₂, $(20 \pm 0,5)$ % CO₂, $(2 \pm 0,2)$ % H₂; допускаемые примеси – 0,1 % O₂, 0,2 % H₂O; температурный режим: за первые 45 мин температуру печи равномерно повышают до 500 °С. Через 3 часа после начала испытания нагревательную печь выключают и отводят от барабана. По истечении 10 минут выключают механизм вращения барабана и вместо восстановительного газа подают нейтральный газ с целью охлаждения пробы. После понижения температуры до 200 °С подачу нейтрального газа прекращают. Барабан с пробой охлаждают воздухом до комнатной температуры, а затем навлекают пробу. Показатель прочности при восстановлении вычисляют как отношение соответствующего класса крупности к общей масса пробы после восстановления.

В качестве исходных данных были использованы результаты исследований спекания агломератов из шихт на основе концентратов АО «МГОК» [3, 4], которые представлены в таблице.

Графически зависимость выхода фракций $+6,3$ мм; $-3,15$ мм; $-0,5$ мм представлена на рисунке 1. Из полученных данных следует, что чем выше барабанная проба агломерата, тем ниже выход фракции $+6,3$ мм и выше содержание классов $-3,15$ мм и $-0,5$ мм в продуктах разрушения агломерата при восстановительно-тепловой обработке. То есть, чем прочнее по показателю барабанной пробы, тем больше он склонен к разрушению при восстановлении. Этот факт, вероятно, связан с минеральным составом ферритной и силикатной связки агломерата, который определяется основностью спека [5, 6], о чем свидетельствуют данные рис. 2: повышение основности способствует улучшению гранулометрического состава продуктов разрушения.

Исходные данные для исследования

№	Показатель	Ед.изм.	Номер пробы [3]				Номер пробы [4]			
			1	2	3	4	1	9	6	12
1	Барабанная проба +5 мм	%	63,1	63,9	64,4	62,4	66,7	66,0	67,7	66,7
2	Барабанная проба – 5 мм	%	7,5	8,9	7,8	7,8	5,56	5,5	5,05	5,47
3	Химический состав									
3.1	Fe	%	51,7	50,8	52,1	49,7	53,5	54,7	52,7	55,1
3.2	FeO	%	10,24	13,5	10,4	9,8	13,8	12,9	13,1	10
3.3	SiO ₂	%	8,7	8,8	8,7	8,3	9,0	8,3	9,3	8,1
3.4	CaO	%	14,7	17,25	14,45	17,3	12,8	11,2	13,5	10,9
3.5	CaO/SiO ₂	ед.	1,69	1,96	1,66	2,08	1,42	1,35	1,45	1,34
4	Испытания по ISO 13930									
4.1	LTD +6,3	%	47,43	47,67	60,73	62,17	55,9	43,5	46,5	41,6
4.2	LTD –3,15	%	21,1	24,45	17,21	16,7	22,5	31,5	30,5	34,5
4.3	LTD –0,5	%	6,62	8,03	6,15	6,33	7,9	11,1	10,2	10,4

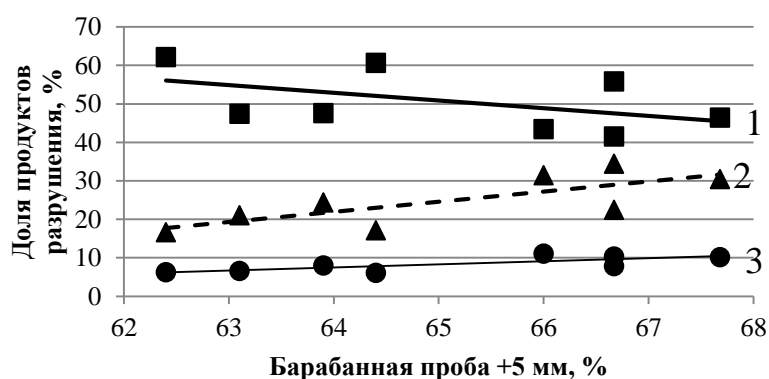


Рис. 1. Зависимость содержания классов (после испытания по ISO 13930) +6,3 мм (1), –3,15 мм (2) и –0,5 мм (3) от значения барабанной пробы +5 мм по ГОСТ 13157–77

Причины этого, вероятно связаны с эволюцией минералогического состава агломерата: основность 1,4–1,5 соответствует максимальному количеству в спеке двухкальциевого силиката и значительным фазовым (при полиморфном превращении силиката кальция) и межфазным напряжениям при его нагреве и восстановлении. Это, в свою очередь, ведет к повышенной разрушаемости агломерата. Исследования минералогического состава и микроструктуры, приведенные в работе [4], показывают, что силикатная связка агломератов основностью 1,34–1,45 представлена железокальциевыми оливинами (пироксен) – 4 % и двухкальциевым силикатом – 14–15 %. Для проб основностью 1,66–2,08 содержание силиката кальция должно быть ниже, а оливинов, ферритов и алюмоферритов кальция – больше. Этим, вероятно, обусловлен повышенный выход крупных фракций при восстановительно-тепловой обработке при повышении основности.

Данных по минералогическому составу спеков основностью 1,66–2,08 в работе [3] не представлено, поэтому дальнейшие исследования авторов будут направлены на доказательство данной гипотезы. Согласно данным работ [7, 8], прочность при восстановлении агломератов из сырья ОАО «Северсталь» и «Rautaruukki Oyj» повышается с ростом основности, что (несмотря на существенные различия исходных концентратов) согласуется с результатами текущего исследования и указывает на универсальность данной закономерности.

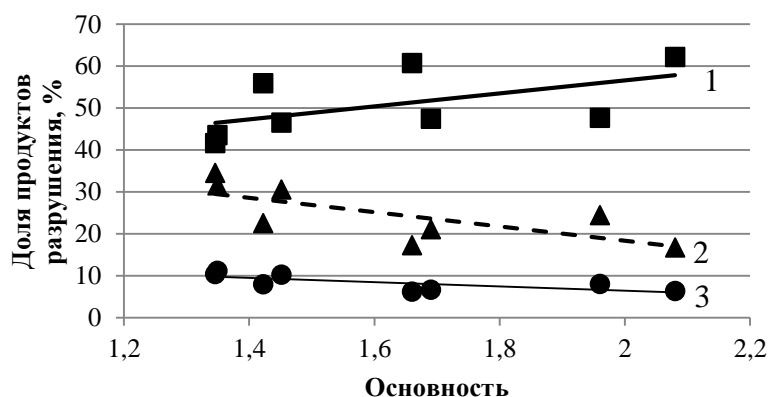


Рис. 2. Зависимость содержания классов (после испытания по ISO 13930) +6,3 мм (1), –3,15 мм (2) и –0,5 мм (3) от значения основности CaO/SiO_2

На рисунке 3 представлена зависимость выхода фракции –0,5 мм при испытании по ISO 13930 от значения барабанной пробы –0,5 мм по ГОСТ 13157–77. Согласно полученным данным, величина $\text{LTD}_{-0,5}$ снижается по мере роста истираемости агломерата. Суммарно выход класса –0,5 мм после обоих испытаний (в «холодном состоянии» и при нагреве-восстановлении) находится в пределах $15,5 \pm 1,5$ % для всех спеков. Вероятно, это количество пыли является предельным для испытанных агломератов и является следствием только механического воздействия на них. Соответственно, формирование пыли класса –0,5 мм из агломерата обусловлено только механическим истиранием при его транспортировке и прохождении через шахту доменной печи, при незначительном влиянии внутренних напряжений.

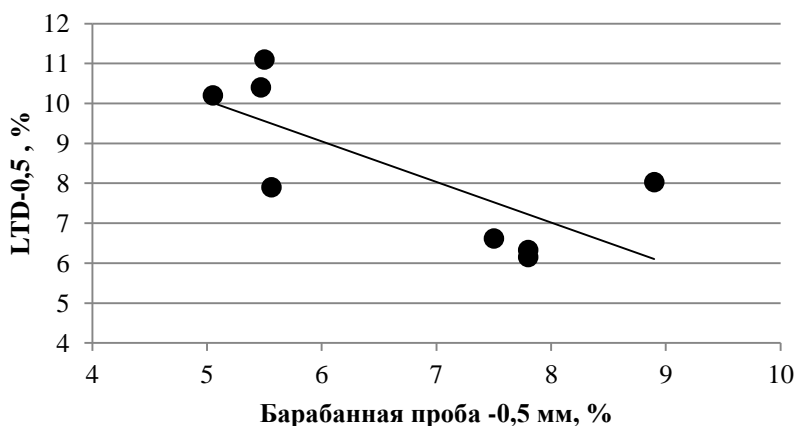


Рис. 3. Зависимость содержания класса –0,5 мм от значения барабанной пробы –0,5 мм по ГОСТ 13157–77

Выводы:

1. Барабанная проба на удар по ГОСТ 13157–77 коррелируется с крупностью продуктов разрушения агломерата при нагреве и восстановлении. Так, при испытаниях проб лабораторных агломератов по ГОСТ 13157–77 и ISO 13930 выявлено, рост барабанной пробы +5 мм сопровождается повышением крупности продуктов разрушения спека при восстановлении (растет выход классов +6,3 мм и +3,15; снижается выход фракции – мм).

2. При повышении основности агломерата растет как «холодная», так и «горячая» прочности. Это, вероятно, связано с тем, что силикатная связка агломератов основностью 1,34–1,45 представлена железокальциевыми оливинами (пироксен) – 4 % и двухкальциевым силикатом – 14–15 %. Для проб основностью 1,66–2,08 содержание силиката кальция должно быть ниже, а оливинов, ферритов и алюмоферритов кальция – больше.

3. Выход класса –0,5 мм при восстановлении ($LTD_{-0,5}$) снижается по мере роста истираемости агломерата. Суммарно выход класса –0,5 мм после обоих испытаний (в «холодном состоянии» и при нагреве-восстановлении) находится в пределах $15,5 \pm 1,5$ % для всех спеков. Вероятно, это количество пыли является предельным для испытанных агломератов и является следствием только механического воздействия на них. Соответственно, формирование пыли класса –0,5 мм из агломерата обусловлено только механическим истиранием при его транспортировке и прохождении через шахту доменной печи, при незначительном влиянии внутренних напряжений.

Таким образом, повышение основности агломерата является способом повышения его металлургических свойств и требует анализа при разработке технических решений по улучшению экономичности доменного процесса.

Список использованных источников

1. Козуб А.В, Панченко А. И., Эфендиев Н. Т. [и др.]. Управление металлургическими свойствами железорудных окатышей как основа стратегии повышения эффективности доменного производства // Сталь. 2016. № 10. С. 4-8.

2. Современный доменный процесс. Введение / М. Геедерс, Р. Ченьо, И. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккерс. – М.: Металлургиздат, 2016. – 280 с.

3. Изменения параметров процесса спекания железорудного агломерата при использовании доломита в производстве ОАО «Уральская Сталь» // И.С. Берсенева, Н.А. Майстренко, А.Ю. Петрышев, Ю.А. Чесноков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 3 (1395). С. 52-57.

4. Металлургические свойства агломератов из концентрата окисленных железистых кварцитов / И.С. Берсенева, А.С. Лопатин, Е.В. Белогуб, Ю.А. Чесноков, Н.К. Анисимов, Н.А. Майстренко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 3. С. 48-53.

5. К вопросу о связи между предельными напряжениями в агломерате и его прочностью во вращающемся барабане / И.С. Берсеньев, В.А. Горбачев, В.И. Клейн, А.Ю. Петрышев, Ю.Г. Ярошенко // Сталь. 2013. № 1. С. 6-8.

6. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2003. – 400 с.

7. Влияние технологических режимов производства агломерата на его прочностные свойства при восстановлении / Т.В. Деткова, С.Е. Веселова // Научно-технический прогресс в металлургии – 2013: материалы международного научного семинара; отв. ред. Э.А. Гарбер, З.К. Кабаков, 2014. С. 18-24.

8. Изучение производительности агломашины и горячей прочности агломерата с использованием нейронных сетей / Реф. Л.И. Александров // Новости черной металлургии за рубежом. 2006. № 2. С. 28-30.

УДК 669.04

С. И. Кондрашенко, И. А. Прибытков

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ И АЭРОДИНАМИКА СТРУИ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПО НОРМАЛИ С ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Аннотация

В работе проведено исследование особенностей развития одиночной свободной струи азота, вытекающей при различной температуре, до и после взаимодействия с ограничивающей поверхностью. Исследования проводились на основании численного моделирования в версии программно-вычислительного комплекса FloEFD, основанного на решении уравнений газодинамики и теплообмена. Решаемая система уравнений состояла из уравнения Навье-Стокса, уравнений энергии и неразрывности и была дополнена k - ϵ моделью турбулентности.

При исследовании аэродинамики и теплообмена одиночной высокотемпературной струи, взаимодействующей с поверхностью, основными определяющими величинами являлись: скорость истечения азота из сопла U_0 , температура истечения азота T_0 , температура среды $T_{ср}$, в которую струя вытекает, внутренний диаметр сопла d_0 , расстояние от среза сопла до поверхности h , расстояние от критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью) по радиусу потока r .

Исследования показали, что при расчете процессов движения и теплообмена при струйном конвективном нагреве металла необходимо учитывать зависимость вязкости газа от температуры и от соотношения температур вытекающего из сопла газа и температуры среды, окружающей струю.

Ключевые слова: струйное течение, кинематический коэффициент вязкости, турбулизация потока, «атакующие» струи, веерный поток, численное моделирование, поля скоростей, критерий Рейнольдса, конвективный нагрев, конвективная теплоотдача.

Abstract

This paper a study was made of the features of the development of a single free nitrogen stream that flows at different temperatures, before and after interaction with the confining surface. The studies were carried out on the basis of numerical simulation in the version of the software-computing